

## ИНТЕГРАЦИЯ СИСТЕМ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА В СРЕДУ АВТОМАТИЗАЦИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА

### АННОТАЦИЯ

В работе изложены основные сведения о программных средствах (пакет Erogу), позволяющих автоматизировать вычислительное моделирование и проводить многодисциплинарную оптимизацию с использованием различных алгоритмов оптимизации. Приводится решение задачи оптимизации теплообменного аппарата с помощью пакета Erogу, автоматизированно использующего для проведения теплогидравлического расчёта CFD пакет FLUENT и препроцессор для создания сеток GAMBIT.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В современной инженерной практике средства вычислительного моделирования получают всё большее распространение, позволяя эффективно изучать физическую картину процессов, протекающих в различных технических системах. Традиционно подготовка расчёта, задание всех параметров модели, анализ результатов и коррекция с их учетом входных данных осуществляются непосредственно исследователем. Многократное повторение этих операций, например при параметрическом анализе, может привести к значительным временным затратам и снижению эффективности процесса исследования. В настоящее время появилась возможность успешно решать эти проблемы при помощи нового поколения систем инженерного обеспечения на базе вычислительной техники, так называемых комплексов автоматизации моделирования и оптимизации (CAEX – Computer Aided EXploration). Среди программных продуктов этого класса наиболее распространёнными и используемыми являются пакеты Erogу (Synaps Inc.) и iSIGHT (Engineous Software).

В настоящей работе проводится комплексное исследование с использованием пакета Erogу и пакета гидрогазодинамических и тепловых расчетов FLUENT.

### 2. ЭТАП ПОДГОТОВКИ РАСЧЁТА

#### 2.1. Описание задачи

В связи с тем, что пакеты инженерного анализа и пакеты оптимизации предлагают довольно широкий набор математических моделей и алгоритмов, каждая из которых, в свою очередь, могут иметь массу настраиваемых параметров, совершенно нецелесообразно начинать исследование на основе реальной конструкции технической системы. Как правило, на

начальном этапе формулируется задача, имеющая предельно упрощённые геометрические характеристики, но где будут присутствовать явления и процессы, происходящие в реальной системе. Такой подход особенно актуален при оптимизации, где важно корректно выбрать и отладить алгоритм поиска оптимального значения целевой функции.

В данной работе рассматривается пример решения тестовой задачи оптимизации теплообменного аппарата простейшей конструкции типа «труба в трубе», работающего по схеме противоток, рис.1.

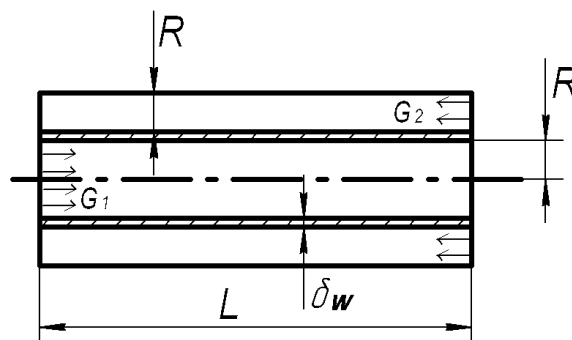


Рис. 1. Теплообменный аппарат типа «труба в трубе»

Холодный теплоноситель – вода, температура 20°C, движется по внутренней трубе с расходом  $G_1$ , горячий теплоноситель – вода, температура 95°C, движется по кольцевому каналу с расходом  $G_2$ . Для уменьшения числа параметров величина просвета кольцевого канала полагалась равной радиусу внутренней трубы, а значение расхода  $G_2$  полагалось в три раза большим значения расхода  $G_1$ . Стенка внутренней трубы имеет толщину  $\delta_w = 1$  мм, материал стенки – сталь. Тепловой поток через внутреннюю поверхность внешней трубы задавался равным нулю. Цель оптимизации заключается в повышении эффективности теплообменного аппарата при обеспечении нагрева холодного теплоносителя на 25°C.

#### 2.2. Общая схема работы комплекса Erogу

Комплекс Erogу состоит из алгоритмов оптимизации и набора команд для работы с расчетной последовательностью [1]. Эта последовательность представляет собой цепочку подключаемых пользователем приложений, результатом работы которых может быть создание твердотельной модели, генерация расчетной сетки, проведение какого-либо

анализа (прочностного, гидродинамического, теплового и т.д.). Приложения, которые включаются в расчётную последовательность, должны отвечать следующим требованиям: возможность запуска из командной строки, поддержка управления файлами-сценариями, а также возможность вывода данных в текстовые файлы. Расчётная последовательность может также включать такие элементы, как другие расчётные последовательности, условные переходы, а также пользовательские процедуры расчета параметров на основе полученных в пакетах анализа данных.

Процесс оптимизации в Erogу строится на передаче расчётной последовательности входных данных, получение в результате её работы выходных данных, обработка этих данных алгоритмом оптимизации и формирование нового набора входных данных. Общая схема работы приведена на рис.2.

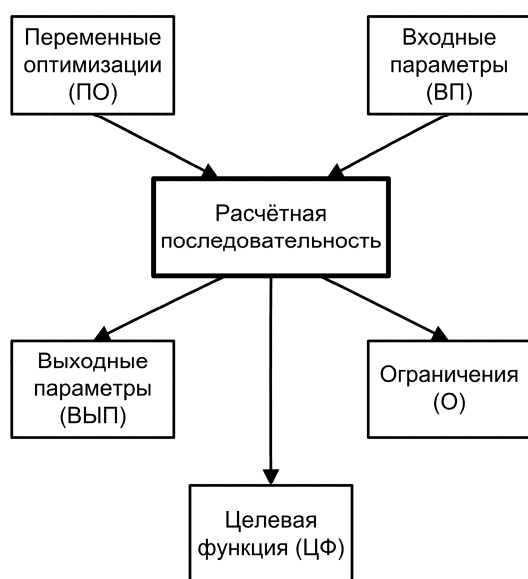


Рис. 2. Общая схема работы

Входные данные разделяются на два типа – переменные оптимизации и входные параметры. Переменные оптимизации — это величины, которые варьируются для максимизации или минимизации некоторой целевой функции, входные параметры — это величины, значения которых не изменяются. Выходные данные могут быть трех типов – выходные параметры, ограничения и целевая функция. Выходные параметры — это величины, которые могут принимать произвольные значения в результате расчета. На тип данных ограничения налагается требование принимать значение из указанного диапазона. Целевая функция это параметр, значение которого требуется оптимизировать.

### 2.3. Организация расчетной последовательности

Для решения задачи оптимизации теплообменного аппарата была создана следующая расчетная последовательность, рис.3. В начале с помощью препроцессора GAMBIT создается расчетная сетка, которая затем передается в пакет FLUENT. В свою

очередь, FLUENT выполняет теплогидравлический расчет теплообменного аппарата с текущими геометрическими характеристиками. Завершает последовательность процедура расчета основных характеристик по полученным в пакете FLUENT данным. В Erogу для написания процедур используется язык TCL.

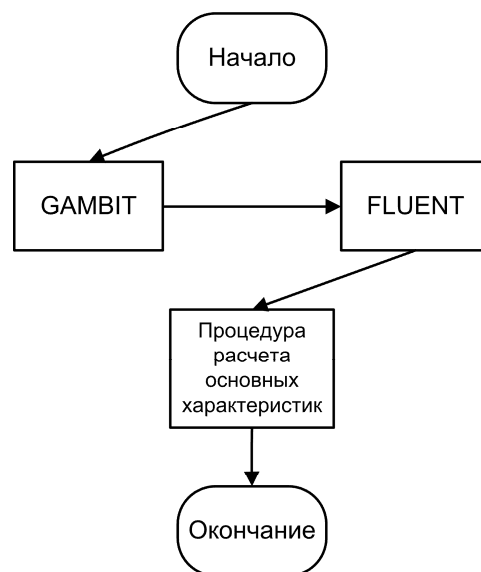


Рис. 3. Расчётная последовательность

### 2.4. Обмен данными в пакете Erogу

Для обмена данными между программными комплексами и Erogу в рамках расчетной последовательности существуют две основные операции: загрузка данных в управляющие файлы-сценарии и экстракция данных из файлов, в которые производится вывод результатов. Эти операции осуществляются при помощи предварительно подготовленных шаблонов. Шаблон представляет собой копию соответствующего файла, куда будет происходить загрузка данных или их экстракция, с указателями, определяющими конкретное местоположение данных в файле.

### 2.5. Аспекты вычислительного моделирования

При проведении теплогидравлического расчета в пакете FLUENT методом конечного объема решалась система стационарных осесимметричных несжимаемых уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу [2]. Для замыкания системы уравнений использовалась стандартная k-ε модель турбулентности высокорейнольдсовой версии. Вблизи стенок применялась стандартная пристеночная функция.

Для аппроксимации конвективных членов уравнений модели турбулентности и энергии использовались противопоточные схемы второго порядка, уравнений импульсов – противопоточные схемы третьего порядка MUSCL. Коррекция давления осуществлялась алгоритмом SIMPLE [2].

Таблица 1. Параметрическая база данных проекта оптимизации

Наименование	Тип	Начальное значение	Минимальное значение	Максимальное значение	Описание
Входные данные					
G	ВП	1,5			Расход горячего теплоносителя
R	ПО	0,05	0,01	0,05	Радиус внутренней трубы
L	ПО	10	10	50	Длина труб теплообменного аппарата
Выходные данные					
Q	ВЫП				Тепловой поток через всю поверхность теплообмена
$\Delta p_1$	ВЫП				Разница давлений на входе и выходе для горячего теплоносителя
$\Delta p_2$	ВЫП				Разница давлений на входе и выходе для холодного теплоносителя
$\Delta T_2$	ВЫП				Перепад температур холодного теплоносителя на входе и выходе
$N_1$	ВЫП				Мощность на прокачку горячего теплоносителя
$N_2$	ВЫП				Мощность на прокачку холодного теплоносителя
N	ВЫП				Суммарная мощность для прокачки обоих теплоносителей
$\eta_{\text{ТОА}}$	ВЫП				Эффективность теплообменного аппарата
F	ЦФ				Целевая функция

Примечания:

ВП – входные параметры, ПО – переменные оптимизации, ВЫП – выходные параметры, ЦФ – целевая функция.

Для адекватного представления координат узлов сетки выбиралась версия решателя с двойной точностью, т.к. в силу специфики задачи продольный размер расчётной области значительно превышает поперечный.

### 3. ПРОВЕДЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 3.1. Выбор целевой функции и расчёт основных характеристик

При проведении исследования ставилась задача определить такие значения параметров  $L$  и  $R$ , чтобы эффективность теплообменного аппарата была максимальной. При этом налагалось требование обеспечить нагрев холодного теплоносителя на  $25^\circ\text{C}$ . Эффективность рассчитывалась по формуле [3]

$$\eta_{\text{ТОА}} = \frac{Q}{N},$$

где  $Q$  – тепловой поток через всю поверхность теплообмена;  $N = N_1 + N_2$  – суммарная мощность на прокачку теплоносителей;  $N_i = \Delta p_i \frac{G_i}{\rho}$  – мощность на прокачку  $i$ -го теплоносителя.

При решении этой задачи в качестве целевой функции могла бы быть выбрана непосредственно

эффективность, а на перепад температур можно было бы наложить ограничение принимать значения, близкие к  $25^\circ\text{C}$ . Однако включение ограничений всегда значительно усложняет топологию параметрического пространства и сужает выбор алгоритмов оптимизации. В силу этих причин было решено построить целевую функцию в виде произведения эффективности и формулы Гаусса с аргументом в виде перепада температур  $\Delta T_2$ :

$$F = \eta_{\text{ТОА}} \cdot e^{-\frac{(\Delta T_2 - 25)^2}{2.5}}.$$

Таким образом, при значениях перепада температур, близких к  $25^\circ\text{C}$ , экспоненциальный множитель стремится к единице, при значениях  $\Delta T_2$ , далеких от  $25^\circ\text{C}$ , выражение, определяющее целевую функцию, стремится к нулю. Все параметры, используемые в расчетах, в пакете Erogen собираются в параметрическую базу данных, табл. 1.

#### 3.2. Алгоритмы оптимизации

Одним из главных достоинств Erogen является возможность решать задачи оптимизации, не имея глубоких знаний об алгоритмах оптимизации. Это достигается благодаря применению стандартного универсального механизма оптимизации [1], который в ходе исследования самостоятельно выбирает

наиболее подходящий алгоритм оптимизации и настраивает его. Пользователю требуется ввести лишь порядок оптимального значения целевой функции и сведения о топологии параметрического пространства. Существует также возможность самостоятельно выбрать алгоритм оптимизации и задать необходимые параметры.

Для оптимизации теплообменного аппарата вначале был использован стандартный универсальный механизм оптимизации. На рис. 4 приведён ход процесса оптимизации.

Дополнительно исследование повторялось с использованием симплексного алгоритма оптимизации (Downhill simplex optimizer), рис. 5, с начальными значениями, табл.1, как для универсального механизма.

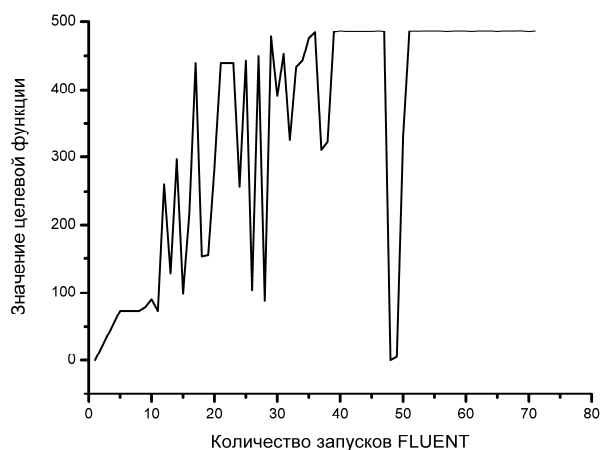


Рис. 4. Оптимизация с использованием стандартного универсального механизма оптимизации

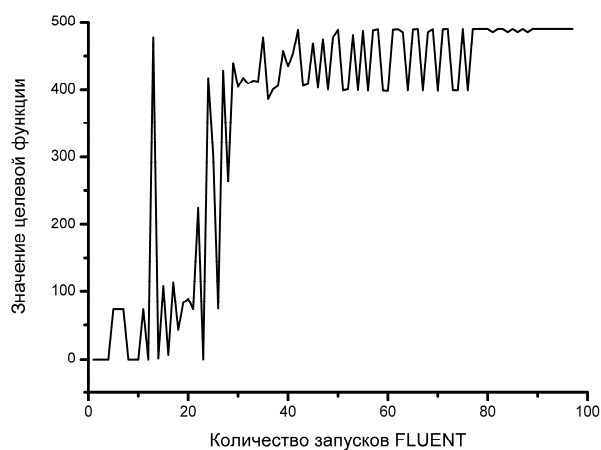


Рис. 5. Оптимизация с использованием симплексного алгоритма оптимизации

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИИ

Результаты оптимизации приведены в табл.2 и 3.

Таблица 2. Результаты оптимизации с использованием стандартного универсального механизма

Параметр	F	$\eta_{\text{ТОА}}$	L	R	$\Delta T_2$
Оптимальное значение	486	1044	50	0.016	23,6

Таблица 3. Результаты оптимизации с использованием симплексного алгоритма оптимизации

Параметр	F	$\eta_{\text{ТОА}}$	L	R	$\Delta T_2$
Оптимальное значение	489	558	48.89	0.014	24,42

Использование стандартного механизма оптимизации позволяет довольно быстро выявить глобальный максимум. Из рис.4 видно, что приблизительно после 55 итераций было получено оптимальное значение целевой функции. Симплексный алгоритм оптимизации «вышел» на оптимальное значение приблизительно после 95 итераций. Максимальное значение целевой функции, полученное этим алгоритмом, оказалось несколько выше, чем значение, полученное универсальным механизмом, хотя эффективность теплообменного аппарата при таких геометрических характеристиках существенно ниже, чем в расчёте универсальным механизмом.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено комплексное исследование с использованием CAEX-CAE технологий. Получены результаты оптимизации геометрических характеристик теплообменного аппарата для обеспечения максимальной эффективности при требуемом нагреве холодного теплоносителя.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю Емельянову В.Н. за помощь и ценные замечания.

#### СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $L$  — длина труб теплообменного аппарата, м;
  - $R$  — радиус внутренней трубы теплообменного аппарата, м;
  - $G$  — расход горячего теплоносителя, м/с;
  - $Q$  — тепловой поток через всю поверхность теплообмена, Вт;
  - $\Delta p$  — разница давлений на входе и выходе, Па;
  - $\Delta T_2$  — перепад температур холодного теплоносителя на входе и выходе, °С;
  - $N$  — мощность, требуемая для прокачки теплоносителя, Вт;
  - $\eta_{\text{ТОА}}$  — эффективность теплообменного аппарата;
  - $\rho$  — плотность теплоносителя, кг/м<sup>3</sup>;
  - $\delta_w$  — толщина стенки внутренней трубы, м;
  - $F$  — целевая функция;
  - CAEX — Computer Aided EXploration (системы автоматизации моделирования и оптимизации);
  - CAE — Computer Aided Engineering (системы инженерного анализа).
- Индексы:
- $i$  — порядковый номер теплоносителя.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ergo 2002B** Users Manual. 2002.
2. **FLUENT 6.2** User's Guide. 2005.
3. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача. — 2-е изд.. М.: Энергия, 1969. 440 с.